



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
26.04.2017 Bulletin 2017/17

(51) Int Cl.:
G01P 7/00 (2006.01) **B61L 25/02 (2006.01)**
G01C 21/16 (2006.01) **G01P 15/00 (2006.01)**

(21) Numéro de dépôt: **16194734.6**

(22) Date de dépôt: **20.10.2016**

(84) Etats contractants désignés:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Etats d'extension désignés:
BA ME
Etats de validation désignés:
MA MD

(71) Demandeur: **Meggitt (Sensorex)**
74166 Archamps (FR)

(72) Inventeur: **VEILLARD, Damien**
74166 (FR)

(74) Mandataire: **Lavoix**
2, place d'Estienne d'Orves
75441 Paris Cedex 09 (FR)

(30) Priorité: **23.10.2015 FR 1560159**

(54) **PROCÉDÉ DE CALCUL DE L'ACCÉLÉRATION PROPRE D'UN VÉHICULE FERROVIAIRE, PRODUIT PROGRAMME D'ORDINATEUR ET SYSTÈME ASSOCIÉS**

(57) Ce procédé de calcul de l'accélération propre d'un véhicule ferroviaire lors du déplacement de celui-ci le long d'une voie ferrée comporte les étapes consistant à : estimer la vitesse de déplacement du véhicule en utilisant une analyse spectrale des premières mesures, estimer les attitudes de roulis et de tangage du véhicule à partir des premières mesures, définir un vecteur de me-

sures composé des premières mesures, des deuxièmes mesures, de la vitesse de déplacement estimée et des attitudes de roulis et de tangage estimées, définir un vecteur d'état comportant au moins une composante correspondant à l'accélération propre du véhicule, appliquer un estimateur d'état pour estimer le vecteur d'état, et extraire l'accélération propre du véhicule de ce vecteur d'état.

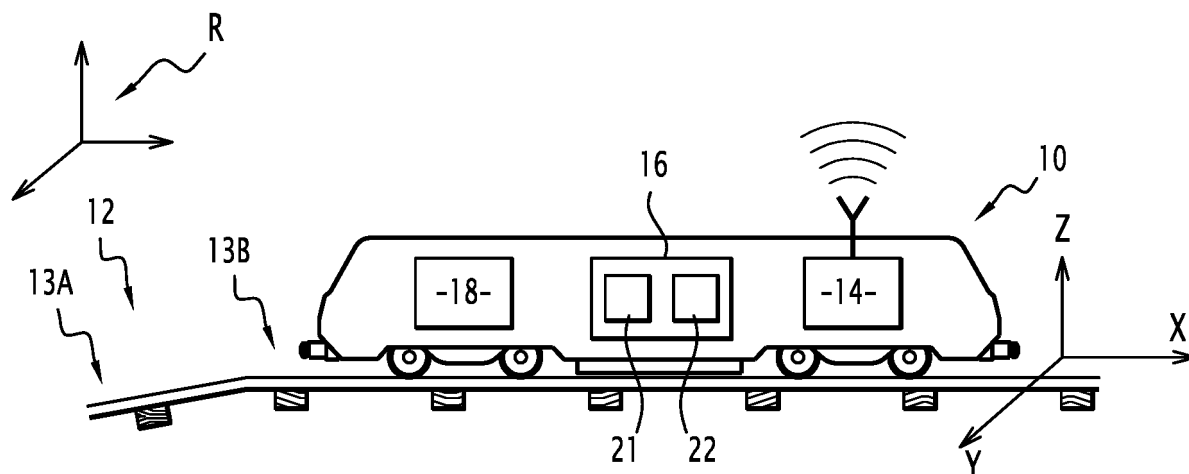


FIG.1

Description

[0001] La présente invention concerne un procédé de calcul de l'accélération propre d'un véhicule ferroviaire lors du déplacement de celui-ci le long d'une voie ferrée.

[0002] Par définition l'accélération propre est l'accélération due au mouvement du véhicule et est donc indépendante de la gravité. L'accélération propre se décompose (dans un repère de Frenet) en une accélération tangentielle, donc colinéaire au sens du mouvement du véhicule ferroviaire, et en une accélération normale ou centripète, donc perpendiculaire au sens du mouvement du véhicule ferroviaire.

[0003] L'accélération propre permet notamment de déterminer la vitesse instantanée et la position exacte du véhicule ferroviaire sur la voie ferrée par la composante tangentielle, indépendamment de la pente.

[0004] Différentes méthodes de détermination de la position d'un véhicule ferroviaire sur une voie ferrée existent dans l'état de la technique.

[0005] Certaines de ces méthodes permettent de déterminer la position du véhicule ferroviaire à partir d'informations acquises par des balises réparties le long de la voie ferrée.

[0006] Ceci est particulièrement le cas d'un système de signalisation, de contrôle et de protection des trains du type ETCS (de l'anglais « European Train Control System »).

[0007] Ce système a pour but de normaliser les systèmes de signalisation présents actuellement dans différents pays européens.

[0008] Un système du type ETCS comprend notamment des balises permettant de collecter en temps réel et de transmettre vers un centre de traitement, l'ensemble des informations relatives à la position précise du train, à sa vitesse, etc.

[0009] Sur la base de ces informations, le centre de traitement donne des commandes appropriées à la signalisation correspondante.

[0010] Toutefois, il existe des risques d'une défaillance technique d'un tel système de signalisation.

[0011] Ceci conduit alors à la nécessité d'avoir des systèmes de localisation embarqués au bord du véhicule ferroviaire permettant notamment d'avoir une information redondante en ce qui concerne la vitesse instantanée et la position exacte du véhicule.

[0012] Plusieurs systèmes de localisation embarqués sont connus dans l'état de la technique.

[0013] Parmi eux, on peut notamment citer des récepteurs de signal GPS, des tachymètres ou encore différents types de radars.

[0014] Cependant, le fonctionnement de tels systèmes de localisation peut être perturbé par des événements extérieurs, tels que par exemple certains événements météorologiques (brouillard, neige, pluie) ou encore la présence d'obstacles environnants comme par exemple les tunnels.

[0015] En outre, il est connu que les systèmes de lo-

calisation basés sur les mesures d'un tachymètre ne fournissent pas de localisation exacte lorsque les conditions d'adhérence entre les roues et les rails sont dégradées. Ceci est particulièrement dû au glissement des roues lors des phases de freinage du véhicule ferroviaire.

[0016] En effet, lors de ces phases, les roues peuvent glisser sur la voie ferrée.

[0017] Un autre type de systèmes de localisation embarqués permet de déterminer la position du véhicule ferroviaire correspondant à partir notamment de mesures inertielles issues d'une centrale inertielle d'acquisition de données embarquée.

[0018] Une telle centrale inertielle comporte généralement au moins un accéléromètre et un gyromètre.

[0019] En particulier, l'accéléromètre permet de mesurer les accélérations réelles du véhicule ferroviaire selon l'axe de son déplacement pour en déduire ensuite la position de ce véhicule.

[0020] Ces mesures peuvent être complétées par des mesures de la vitesse angulaire du véhicule ferroviaire fournies par le gyromètre apte à mesurer des accélérations angulaires autour au moins d'un axe.

[0021] Toutefois, la position exacte du véhicule ferroviaire ne peut pas être obtenue directement à partir des mesures de son accélération réelle.

[0022] En effet, la position exacte doit être déterminée à partir de l'accélération propre de ce véhicule, c'est-à-dire de l'accélération due au déplacement de ce véhicule le long de la voie ferrée sans prise en compte de l'accélération due par exemple à la topologie de la voie.

[0023] Autrement dit, il est nécessaire de soustraire, des mesures prises par l'accéléromètre, l'accélération due à la topologie de la voie.

[0024] Ainsi, pour obtenir l'accélération propre, les systèmes de localisation existants utilisent généralement des données supplémentaires.

[0025] Ces données sont par exemple relatives à la topologie de la voie ou comprennent des mesures autres que les mesures inertielles telles que par exemple la vitesse issue d'un tachymètre ou la position issue d'un récepteur GPS.

[0026] On conçoit alors que ces données supplémentaires ne sont pas toujours disponibles et peuvent être considérablement erronées.

[0027] En outre, la nécessité de la prise en compte de telles données conduit à des systèmes de localisation à structure complexe.

[0028] La présente invention a pour but de proposer un procédé de calcul de l'accélération propre d'un véhicule ferroviaire permettant de déterminer l'accélération propre et notamment l'accélération tangentielle de ce véhicule de manière particulièrement précise et ceci uniquement à partir des mesures inertielles, c'est-à-dire, à partir des mesures fournies par un accéléromètre et un gyromètre.

[0029] À cet effet, l'invention a pour objet un procédé de calcul de l'accélération propre d'un véhicule ferroviaire lors du déplacement de celui-ci le long d'une voie fer-

rée, le véhicule ferroviaire comportant une centrale inertielle d'acquisition de données comprenant un accéléromètre permettant de fournir des premières mesures correspondant aux accélérations réelles du véhicule ferroviaire selon trois axes orthogonaux, et un gyromètre permettant de fournir des deuxième mesures correspondant aux vitesses angulaires du véhicule ferroviaire selon trois axes orthogonaux.

[0030] Le procédé comporte les étapes suivantes :

- estimer la vitesse de déplacement du véhicule ferroviaire en utilisant une analyse spectrale des premières mesures ;
- estimer les attitudes de roulis et de tangage du véhicule ferroviaire à partir des premières mesures ;
- définir un vecteur de mesures composé des premières mesures, des deuxième mesures, de la vitesse de déplacement du véhicule ferroviaire estimée et des attitudes de roulis et de tangage du véhicule ferroviaire estimées ;
- définir un vecteur d'état comportant au moins une composante correspondant à l'accélération propre du véhicule ferroviaire selon au moins un axe ;
- appliquer un estimateur d'état pour estimer le vecteur d'état en utilisant le vecteur de mesures ;
- extraire l'accélération propre du véhicule ferroviaire de ce vecteur d'état.

[0031] Suivant d'autres aspects avantageux de l'invention, le procédé comprend une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prise(s) isolément ou suivant toutes les combinaisons techniquement possibles :

- l'estimation de la vitesse de déplacement du véhicule ferroviaire est effectuée en utilisant une analyse spectrale des premières mesures correspondant aux accélérations réelles du véhicule ferroviaire selon un axe vertical ;
- l'estimation de la vitesse de déplacement du véhicule ferroviaire comprend le calcul d'une transformation de Fourier rapide desdites premières mesures ;
- lors de chaque itération suivante du procédé, l'estimation des attitudes de roulis et de tangage du véhicule ferroviaire comprend le calcul d'une correction d'angle d'estimation dépendant de la différence entre la vitesse estimée de déplacement du véhicule ferroviaire et l'intégration de l'estimation de l'accélération propre du véhicule ferroviaire calculée lors d'une précédente itération du procédé ;
- le vecteur d'état comporte les composantes correspondant à trois accélérations propres du véhicule ferroviaire selon trois axes orthogonaux dans un repère fixe ; les angles d'Euler représentant l'attitude et l'orientation du train ; les vitesses angulaires étant les dérivées des angles d'Euler ; des biais du gyromètre selon au moins deux axes ; et une vitesse curviligne du véhicule ferroviaire ;

- lors de chaque itération suivante du procédé, l'application de l'estimateur d'état comprend le calcul d'une estimation suivante d'un vecteur d'état suivant à partir d'un vecteur de mesures suivant et d'une estimation précédente d'un vecteur d'état précédent déterminée lors d'une précédente itération du procédé ;
- il comprend en outre une étape d'auto-calibration effectuée lorsque le véhicule ferroviaire est à l'arrêt ;
- l'étape d'auto-calibration comprend la correction des estimations sur des biais du gyromètre et la correction sur les estimations des attitudes de roulis et tangage ;
- l'estimateur d'état est un filtre de Kalman ;
- des instructions logicielles qui, lorsque mises en oeuvre par un équipement informatique, mettent en oeuvre un procédé tel que décrit précédemment.

[0032] L'invention a également pour objet un produit programme d'ordinateur comportant des instructions logicielles qui, lorsque mises en oeuvre par un équipement informatique, mettent en oeuvre un procédé tel que défini ci-dessus.

[0033] L'invention a également pour objet un système calcul de l'accélération propre d'un véhicule ferroviaire lors du déplacement de celui-ci le long d'une voie ferrée, le véhicule ferroviaire comportant une centrale inertielle d'acquisition de données comprenant un accéléromètre permettant de fournir des premières mesures correspondant aux accélérations réelles du véhicule ferroviaire selon trois axes orthogonaux, et un gyromètre permettant de fournir des deuxième mesures correspondant aux vitesses angulaires du véhicule ferroviaire selon trois axes orthogonaux.

[0034] Le système est apte à : estimer la vitesse de déplacement du véhicule ferroviaire en utilisant une analyse spectrale des premières mesures ; estimer les attitudes de roulis et de tangage du véhicule ferroviaire à partir des premières mesures ; définir un vecteur de mesures composé des premières mesures, des deuxième mesures, de la vitesse de déplacement du véhicule ferroviaire estimée et des attitudes de roulis et de tangage du véhicule ferroviaire estimées ; définir un vecteur d'état comportant au moins une composante correspondant à l'accélération propre du véhicule ferroviaire selon au moins un axe ; appliquer un estimateur d'état pour estimer le vecteur d'état en utilisant le vecteur de mesures ; extraire l'accélération propre du véhicule ferroviaire de ce vecteur d'état.

[0035] Ces caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif, et faite en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

- la figure 1 est une vue schématique d'un véhicule ferroviaire se déplaçant le long d'une voie ferrée et comportant un système de calcul de l'accélération propre selon l'invention ;

- la figure 2 est une vue schématique détaillée du système de calcul de la figure 1 ; et
- la figure 3 est un organigramme d'un procédé de calcul selon l'invention.

[0036] On a en effet illustré sur la figure 1, un véhicule ferroviaire 10 se déplaçant le long d'une voie ferrée 12 et comportant des moyens de communication 14 connus en soi, une centrale inertielle d'acquisition de données 16 et un système de calcul 18 selon l'invention.

[0037] Le véhicule ferroviaire 10 est par exemple un train comportant notamment une locomotive pilotée par un conducteur.

[0038] Dans l'exemple illustré sur la figure 1, un repère mobile XYZ est associé au véhicule ferroviaire 10.

[0039] Le repère mobile XYZ est formé d'un axe de déplacement X suivant la voie ferrée 12, d'un axe transversal Y perpendiculaire à cette voie dans un plan horizontal, et d'un axe vertical Z perpendiculaire à l'axe transversal Y et à l'axe de déplacement X.

[0040] Le repère mobile XYZ est mobile par rapport à un repère fixe R.

[0041] Le repère fixe R est par exemple un repère du type NED (de l'anglais « North East Down ») présentant trois axes orthogonaux dont un axe coïncide avec la direction nord, un axe coïncide avec la direction Est et un axe coïncide avec la direction verticale.

[0042] La voie ferrée 12 est composée d'une pluralité de portions 13A, 13B comprenant chacune par exemple deux rails parallèles et un système de signalisation du type ETCS (de l'anglais « European Train Control System »).

[0043] Le système de signalisation est notamment apte à communiquer avec les moyens de communication 14 du véhicule ferroviaire 10, pour, par exemple, déterminer sa position exacte, sa vitesse ou bien d'autres paramètres relatifs au véhicule 10.

[0044] Les portions 13A, 13B de la voie ferrée 12 présentent par exemple des topologies différentes.

[0045] Ainsi, selon l'exemple de réalisation de la figure 1, les rails de la portion 13B sont disposés dans un plan horizontal du repère fixe R et les rails de la portion 13A sont légèrement inclinés par rapport à ce plan.

[0046] Ainsi, lors du déplacement le long de la voie ferrée 12, le véhicule ferroviaire 10 subit des accélérations réelles composées des accélérations dues à la topologie de la voie (pentes, dévers etc.) avec notamment la force gravitationnelle et des accélérations propres liées au déplacement du véhicule ferroviaire 10 le long de la voie 12.

[0047] En particulier, les accélérations propres du véhicule ferroviaire 10 ne dépendent pas de la topologie de la voie 12, et notamment de la force gravitationnelle.

[0048] La centrale inertielle 16 comprend un accéléromètre 21 permettant de fournir des premières mesures relatives à l'accélération réelle du véhicule ferroviaire 10 et un gyromètre 22 permettant de fournir des deuxièmes mesures relatives à la vitesse angulaire du véhicule fer-

roviaire 10.

[0049] En particulier, les premières mesures comprennent des mesures ax , ay et az correspondant aux accélérations réelles du véhicule ferroviaire 10 respectivement selon les axes X, Y et Z.

[0050] Ainsi, les accélérations réelles présentent la somme des forces accélérométriques projetées sur les axes sensibles X, Y et Z de l'accéléromètre.

[0051] Les deuxièmes mesures comprennent des mesures gx , gy et gz correspondant aux vitesses angulaires du véhicule ferroviaire 10 respectivement selon les axes X, Y et Z.

[0052] Le système de calcul 18 permet d'estimer notamment les accélérations propres du véhicule ferroviaire 10 à chaque instant selon un procédé de calcul de l'accélération propre décrit plus en détail par la suite.

[0053] Le système de calcul 18 permet ainsi de déterminer la position exacte du véhicule ferroviaire 10 indépendamment du système de signalisation.

[0054] Le système de calcul 18 est illustré plus en détail sur la figure 2.

[0055] Ainsi, en référence à cette figure 2, le système de calcul 18 comporte un module d'entrée 24, un module de traitement 26 et un module de sortie 28.

[0056] Le module d'entrée 24 est raccordé à l'accéléromètre 21 et au gyromètre 22, et est apte à recevoir à chaque instant des mesures issues de ces dispositifs.

[0057] Le module de traitement 26 est apte à traiter les mesures reçues pour estimer notamment l'accélération propre du véhicule ferroviaire 10.

[0058] Le module de traitement 26 est par exemple réalisé sous la forme d'un logiciel qui est mis en oeuvre par un calculateur embarqué.

[0059] Le module de sortie 28 est apte à transmettre les estimations produites par le module de traitement 26 par exemple au conducteur et/ou à un système de contrôle embarqué ou distant du véhicule ferroviaire 10.

[0060] Le procédé de calcul de l'accélération propre selon l'invention va désormais être expliqué en référence à la figure 3 illustrant un ordigramme de ses étapes.

[0061] Initialement, le véhicule ferroviaire 10 circule le long de la voie ferrée 12.

[0062] À chaque instant t , l'accéléromètre 21 et le gyromètre 22 prennent des mesures correspondantes.

[0063] Le procédé de calcul est itéré par le système de calcul 20 pour chaque instant t .

[0064] Lors d'une étape initiale 110, le module d'entrée 24 acquiert des mesures prises par l'accéléromètre 21 et le gyromètre 22 à l'instant t .

[0065] En particulier, ces mesures comprennent des mesures ax , ay et az des accélérations du véhicule ferroviaire 10 selon respectivement les axes X, Y et Z, et des mesures gx , gy et gz des vitesses angulaires du véhicule ferroviaire 10 selon respectivement les axes X, Y et Z.

[0066] Par ailleurs, les mesures de l'accélération az du véhicule ferroviaire 10 selon l'axe verticale Z sont acquises sous la forme de N échantillons $az_0, \dots, az_{N-1}$ dans

une fenêtre temporelle prédéterminée, le paramètre N étant un nombre pair naturel.

[0067] Puis, le module d'entrée 24 transmet ces mesures au module de traitement 26.

[0068] Lors d'une étape suivante 120, le module de traitement 26 estime la vitesse de déplacement du véhicule ferroviaire 10 en utilisant une analyse spectrale des échantillons de l'accélération az du véhicule ferroviaire 10 selon l'axe verticale Z.

[0069] En variante, le module de traitement 26 estime la vitesse de déplacement du véhicule ferroviaire 10 en utilisant une analyse spectrale des échantillons de l'accélération du véhicule ferroviaire 10 selon l'axe X ou l'axe Y.

[0070] Pour ce faire, le module de traitement 26 calcule d'abord une transformation de Fourier rapide des échantillons $az_0, \dots, az_{N-1}$ pour obtenir une densité spectrale de puissance $FFT_k(t)$ qui est déterminée par l'expression suivante :

$$FFT_k(t) = \sum_{n=0}^{N-1} az_n e^{\frac{i2\pi kn}{N}}$$

[0071] Puis, le module de traitement 26 calcule la puissance du spectre $P_{FFT}(t)$ en utilisant l'expression suivante :

$$P_{FFT}(t) = \sum_{k=2}^{N/2} |FFT_k(t)|.$$

[0072] Finalement, la vitesse estimée $v_{FFT}(t)$ du véhicule 10 est déterminée en normalisant la puissance du spectre $P_{FFT}(t)$ selon l'expression suivante :

$$v_{FFT}(t) = \rho \sqrt{P_{FFT}(t)} + \beta,$$

où p est un facteur d'échelle et β est un biais. La valeur p est connue *a priori* et est déterminée par exemple par le constructeur du gyromètre 21. La valeur β s'équilibre par exemple à chaque démarrage du système de calcul 18.

[0073] Lors d'une étape 130 suivante, le module de traitement 26 estime les attitudes de roulis ϕ_{acc} et de tangage θ_{acc} du véhicule ferroviaire 10 à partir des premières mesures.

[0074] En particulier, le module de traitement utilise les formules suivantes pour déterminer ces valeurs :

$$\phi_{acc} = \text{atan} \left(\frac{ay}{\sqrt{ax^2 + az^2}} \right),$$

$$\theta_{acc} = \text{atan} \left(\frac{ax}{\sqrt{ay^2 + az^2}} \right) + \xi_{\Delta v},$$

où $\xi_{\Delta v}$ est une correction d'angle qui dépend de la différence entre l'estimation de la vitesse $v_{FFT}(t)$ déterminée lors de l'étape 120 et l'intégration de l'accélération tangentielle autrement dit de l'accélération propre selon l'axe X du véhicule ferroviaire 10 lors de la précédente itération du procédé.

[0075] Lors d'une étape 140, le module de traitement 28 définit un vecteur de mesures y_t et un vecteur d'état x_t à l'instant t selon les expressions suivantes :

$$y_t = \begin{bmatrix} ax \\ ay \\ az \\ gx \\ gy \\ gz \\ \phi_{acc} \\ \theta_{acc} \\ v_{FFT} \end{bmatrix}, \quad x_t = \begin{bmatrix} \phi \\ \dot{\phi} \\ \psi \\ \dot{\psi} \\ \phi \\ \theta \\ \psi \\ p \\ q \\ r \\ v \\ \beta_{gx} \\ \beta_{gy} \end{bmatrix},$$

où :

ϕ, θ et ψ sont les angles d'Euler définissant l'attitude et l'orientation du véhicule ferroviaire. Les angles d'Euler permettent également le passage entre le repère mobile XYZ et le repère fixe R ;

$\dot{\phi}, \dot{\theta}$ et $\dot{\psi}$ sont les dérivées des angles d'Euler ;

p, q et r sont les accélérations propres du véhicule ferroviaire 10 projetées sur les trois axes du repère fixe R ;

v est la vitesse curviligne du véhicule ferroviaire 10 ; et

β_{gx} et β_{gy} sont les biais du gyromètre 22 selon respectivement les axes X et Y.

[0076] Ainsi, le vecteur de mesures y_t est composé des premières mesures, des deuxième mesures, de la vitesse estimée $v_{FFT}(t)$ de déplacement du véhicule ferroviaire 10 et des attitudes de roulis ϕ_{acc} et de tangage θ_{acc} du véhicule ferroviaire 10 estimées.

[0077] Le vecteur d'état x_t est composé notamment des accélérations propres p, q et r du véhicule ferroviaire 10 projetées sur les trois axes du repère fixe R. Par ailleurs, dans le repère mobile, l'accélération propre selon l'axe X est l'accélération tangentielle du véhicule ferroviaire 10, et l'accélération propre selon l'axe Y est l'accélération centripète du véhicule ferroviaire 10.

[0078] Lors d'une étape 150 suivante, le module de

traitement 26 applique un estimateur d'état tel que par exemple un filtre de Kalman, pour estimer le vecteur d'état x_t en utilisant le vecteur de mesures y_t .

[0079] Bien entendu d'autres estimateurs peuvent être envisagés.

[0080] En particulier, lors de cette étape 150, une estimation $\hat{x}_{t|t}$ du vecteur d'état x_t est obtenue à partir du vecteur de mesures y_t et d'une estimation $\hat{x}_{t-1|t-1}$ d'un vecteur d'état x_{t-1} déterminée lors de la précédente itération du procédé.

[0081] Pour ce faire, l'étape 150 comporte une phase de prédiction consistant à obtenir un vecteur d'état prédit $\hat{x}_{t|t-1}$ à partir notamment de l'estimation $\hat{x}_{t-1|t-1}$, et une phase d'observation consistant à obtenir l'estimation $\hat{x}_{t|t}$ à partir du vecteur d'état prédit $\hat{x}_{t|t-1}$ et le vecteur de mesures y_t .

[0082] Lors de la phase de prédiction, le vecteur d'état prédit $\hat{x}_{t|t-1}$ est obtenu comme suit :

$$\hat{x}_{t|t-1} = F_{t-1} \hat{x}_{t-1|t-1},$$

$$P_{t|t-1} = F_{t-1} P_{t-1|t-1} F_{t-1}^T + Q_{t-1},$$

où

F_{t-1} est une matrice de transition entre les instants $t-1$ et t ;

$P_{t|t-1}$ est une matrice *a priori* de la covariance de l'erreur déterminée notamment à partir d'une matrice précédente $P_{t-1|t-1}$ déterminée lors de la phase d'observation de la précédente itération du procédé selon la formule explicitée ci-après ; et

Q_{t-1} est une matrice de covariance du bruit de processus.

[0083] Lors de la phase d'observation, l'estimation $\hat{x}_{t|t}$ du vecteur d'état x_t est obtenue comme suit :

$$K_t = P_{t|t-1} H_t^T (H_t P_{t|t-1} H_t^T + R_t)^{-1},$$

$$\hat{x}_{t|t} = \hat{x}_{t|t-1} + K_t (y_t - H_t \hat{x}_{t|t-1}),$$

$$P_{t|t} = P_{t|t-1} - K_t H_t P_{t|t-1},$$

où

K_t est le gain de Kalman ;

R_t est une matrice de covariance du bruit de mesure ;

H_t est une matrice reliant le vecteur de mesures y_t et le vecteur d'état x_t ; et

$P_{t|t}$ est une matrice *a posteriori* de la covariance de l'erreur calculée pour la prochaine itération du procédé.

[0084] Lors d'une étape 160 suivante, le vecteur d'estimation $\hat{x}_{t|t}$ du vecteur d'état x_t est transmis au module de sortie 28 qui en extrait notamment les estimations des accélérations propres p , q et r projetés sur les axes du repère fixe R.

[0085] Ces accélérations sont ensuite utilisées pour déterminer par exemple la position exacte du véhicule ferroviaire 10. En particulier, ces accélérations sont ensuite projetées dans le repère mobile XYZ afin d'extraire l'accélération tangentielle (suivant l'axe X) qui servira au calcul de la position.

[0086] Puis, les étapes 110 à 160 décrites sont répétées de manière itérative.

[0087] Lorsque le véhicule ferroviaire 10 est à l'arrêt, le module de traitement 26 met en oeuvre une étape 170 d'auto-calibration.

[0088] En particulier, lors de cette étape 170, le module de traitement 26 corrige les éventuelles erreurs cumulées dans le temps tel qu'un mauvais suivi des biais du gyromètre 22.

[0089] Le module de traitement 26 corrige donc les estimations sur les biais β_{gx} et β_{gy} du gyromètre 22.

[0090] Lors de la même étape 170, le module de traitement 26 corrige en outre les estimations des attitudes de roulis ϕ_{acc} et de tangage θ_{acc} .

[0091] Il est à noter que l'étape 170 d'auto-calibration est possible grâce au réglage en temps réel de la matrice Q_t de covariance du bruit de processus et de la matrice R_t de covariance du bruit de mesure.

[0092] On conçoit alors que la présente invention présente un certain nombre d'avantages.

[0093] En particulier, l'invention permet d'obtenir des estimations de l'accélération propre d'un véhicule ferroviaire et notamment l'accélération tangentielle uniquement à partir des mesures de l'accéléromètre et du gyromètre.

[0094] Ces estimations sont particulièrement précises grâce notamment à l'étape 120 d'estimation de la vitesse de déplacement du véhicule ferroviaire.

[0095] Ceci permet alors d'éviter l'utilisation des dispositifs de mesures supplémentaires tels qu'un tachymètre ou un récepteur du signal GPS.

[0096] Finalement, les estimations d'attitude de roulis ϕ_{acc} et de tangage θ_{acc} extraites du vecteur d'état estimé $\hat{x}_{t|t}$ permettent un suivi en temps réel de l'attitude du véhicule ferroviaire et permettent d'éviter l'utilisation des données relatives à la topologie de la voie et de récupérer ainsi de l'espace de stockage dans les calculateurs embarqués.

[0097] Bien entendu, d'autres modes de réalisation de l'invention sont également possibles.

Revendications

1. Procédé de calcul de l'accélération propre d'un véhicule ferroviaire (10) lors du déplacement de celui-ci le long d'une voie ferrée (12), le véhicule ferroviaire (10) comportant une centrale inertielle d'acquisition de données (16) comprenant un accéléromètre (21) permettant de fournir des premières mesures correspondant aux accélérations réelles du véhicule ferroviaire (10) selon trois axes orthogonaux (X, Y, Z), et un gyromètre (22) permettant de fournir des deuxièmes mesures correspondant aux vitesses angulaires du véhicule ferroviaire (10) selon trois axes orthogonaux (X, Y, Z) ;
le procédé étant **caractérisé en ce qu'il** comporte les étapes suivantes :
 - estimer (120) la vitesse de déplacement du véhicule ferroviaire (10) en utilisant une analyse spectrale des premières mesures ;
 - estimer (130) les attitudes de roulis (ϕ_{acc}) et de tangage (θ_{acc}) du véhicule ferroviaire (10) à partir des premières mesures ;
 - définir (140) un vecteur de mesures (y_t) composé des premières mesures, des deuxièmes mesures, de la vitesse de déplacement du véhicule ferroviaire estimée et des attitudes de roulis (ϕ_{acc}) et de tangage (θ_{acc}) du véhicule ferroviaire (10) estimées ;
 - définir (140) un vecteur d'état (x_t) comportant au moins une composante (p, q, r) correspondant à l'accélération propre du véhicule ferroviaire selon au moins un axe (X, Y, Z) ;
 - appliquer (150) un estimateur d'état pour estimer le vecteur d'état (x_t) en utilisant le vecteur de mesures (y_t) ;
 - extraire (160) l'accélération propre du véhicule ferroviaire (10) de ce vecteur d'état.
2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** l'estimation de la vitesse de déplacement du véhicule ferroviaire (10) est effectuée en utilisant une analyse spectrale des premières mesures correspondant aux accélérations réelles du véhicule ferroviaire (10) selon un axe vertical (Z).
3. Procédé selon la revendication 2, **caractérisé en ce que** l'estimation de la vitesse de déplacement du véhicule ferroviaire (10) comprend le calcul d'une transformation de Fourier rapide desdites premières mesures.
4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** lors de chaque itération suivante du procédé, l'estimation des attitudes de roulis (ϕ_{acc}) et de tangage (θ_{acc}) du véhicule ferroviaire (10) comprend le calcul d'une correction d'angle ($\xi_{\Delta\psi}$) d'estimation dépendant de la différence entre la vitesse estimée de déplacement du véhicule ferroviaire (10) et l'intégration de l'estimation de l'accélération propre du véhicule ferroviaire (10) calculée lors d'une précédente itération du procédé.
5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le vecteur d'état (x_t) comporte les composantes correspondant à :
 - trois accélérations propres (p, q, r) du véhicule ferroviaire (10) selon trois axes orthogonaux dans un repère fixe (R) ;
 - les angles d'Euler (ϕ, θ, ψ) représentant l'attitude et l'orientation du train ;
 - les vitesses angulaires ($\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$) étant les dérivées des angles d'Euler ;
 - des biais (β_{gx}, β_{gy}) du gyromètre (22) selon au moins deux axes ; et
 - une vitesse curviligne (v) du véhicule ferroviaire (10).
6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** lors de chaque itération suivante du procédé, l'application de l'estimateur d'état comprend le calcul d'une estimation suivante ($\hat{x}_{t|t}$) d'un vecteur d'état suivant (x_t) à partir d'un vecteur de mesures suivant (y_t) et d'une estimation précédente ($\hat{x}_{t-1|t-1}$) d'un vecteur d'état précédent (x_{t-1}) déterminée lors d'une précédente itération du procédé.
7. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'il** comprend en outre une étape (170) d'auto-calibration effectuée lorsque le véhicule ferroviaire (10) est à l'arrêt.
8. Procédé selon la revendication 7, **caractérisé en ce que** l'étape d'auto-calibration (170) comprend la correction des estimations sur des biais (β_{gx}, β_{gy}) du gyromètre (22) et la correction sur les estimations des attitudes de roulis (ϕ_{acc}) et tangage (θ_{acc}).
9. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce l'estimateur d'état est un filtre de Kalman.
10. Produit programme d'ordinateur comportant des instructions logicielles qui, lorsque mises en oeuvre par un équipement informatique, mettent en oeuvre un procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes.
11. Système (20) de calcul de l'accélération propre d'un véhicule ferroviaire (10) lors du déplacement de celui-ci le long d'une voie ferrée (12), le véhicule ferroviaire (10) comportant une centrale inertielle d'acquisition de données (16) comprenant un accéléro-

mètre (21) permettant de fournir des premières mesures correspondant aux accélérations réelles du véhicule ferroviaire (10) selon trois axes orthogonaux (X, Y, Z), et un gyromètre (22) permettant de fournir des deuxièmes mesures correspondant aux vitesses angulaires du véhicule ferroviaire (10) selon trois axes orthogonaux (X, Y, Z) ;

le système étant **caractérisé en ce qu'il** est apte à :

- estimer (120) la vitesse de déplacement du véhicule ferroviaire (10) en utilisant une analyse spectrale des premières mesures ;
- estimer (130) les attitudes de roulis (ϕ_{acc}) et de tangage (θ_{acc}) du véhicule ferroviaire (10) à partir des premières mesures ;
- définir (140) un vecteur de mesures (y_t) composé des premières mesures, des deuxièmes mesures, de la vitesse de déplacement du véhicule ferroviaire estimée et des attitudes de roulis (ϕ_{acc}) et de tangage (θ_{acc}) du véhicule ferroviaire (10) estimées ;
- définir (140) un vecteur d'état (x_t) comportant au moins une composante (p, q, r) correspondant à l'accélération propre du véhicule ferroviaire selon au moins un axe (X, Y, Z) ;
- appliquer (150) un estimateur d'état pour estimer le vecteur d'état (x_t) en utilisant le vecteur de mesures (y_t) ;
- extraire (160) l'accélération propre du véhicule ferroviaire (10) de ce vecteur d'état.

35

40

45

50

55

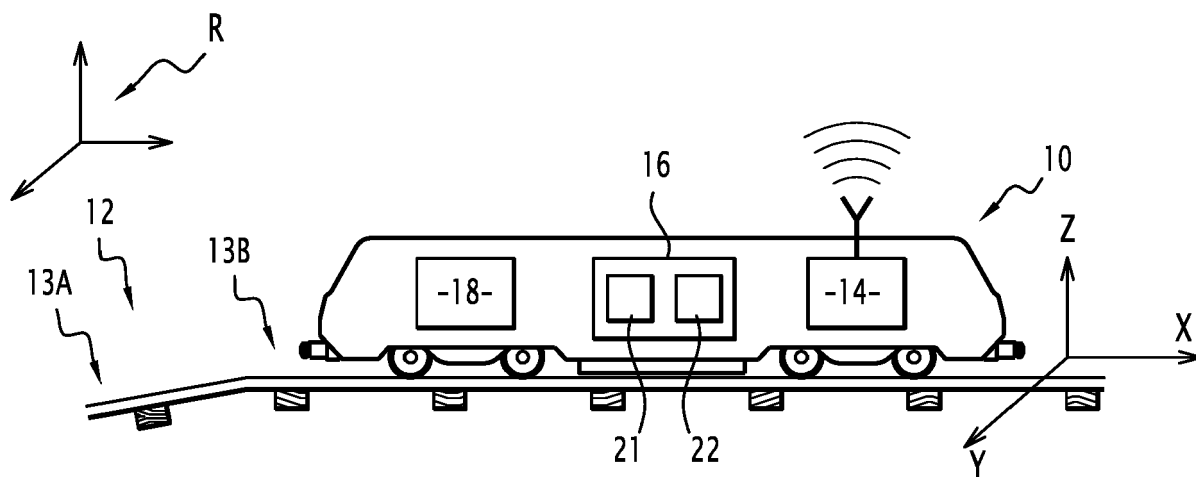


FIG.1

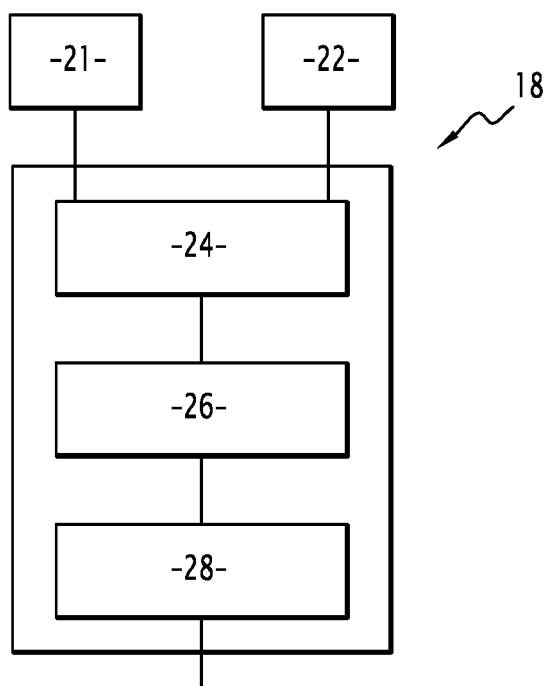


FIG.2

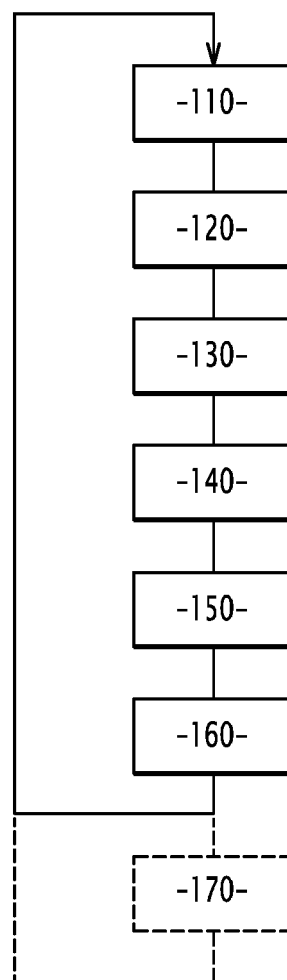


FIG.3



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 16 19 4734

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
Y	US 2009/326851 A1 (TANENHAUS MARTIN E [US]) 31 décembre 2009 (2009-12-31) * alinéa [0003] - alinéa [0004] * * alinéa [0105] * * alinéa [0117] - alinéa [0120] * * alinéa [0136] - alinéa [0140] * * figures 3, 19 *	1-11	INV. G01P7/00 B61L25/02 G01C21/16 G01P15/00
Y	DE 10 2012 219109 A1 (DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT UND RAUMFAHRT E V [DE]) 24 avril 2014 (2014-04-24) * alinéa [0002] * * alinéa [0006] - alinéa [0008] *	1-11	
Y	US 6 459 990 B1 (MCCALL HIRAM [US] ET AL) 1 octobre 2002 (2002-10-01) * colonne 2, ligne 60 - ligne 65 * * colonne 16, ligne 21 - ligne 67 * * colonne 20, ligne 60 - colonne 21, ligne 21 * * figures 1, 13, 14 *	1-11	
A	US 2005/065726 A1 (MEYER THOMAS J [US] ET AL) 24 mars 2005 (2005-03-24) * alinéa [0005] * * alinéa [0035] - alinéa [0037] * * alinéa [0112] *	1-11	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC) G01P B61L G01C
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche Munich		Date d'achèvement de la recherche 9 janvier 2017	Examineur Rabenstein, Winfried
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 16 19 4734

5 La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

09-01-2017

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2009326851 A1	31-12-2009	US 2009326851 A1	31-12-2009
		US 2013173207 A1	04-07-2013
DE 102012219109 A1	24-04-2014	AUCUN	
US 6459990 B1	01-10-2002	AUCUN	
US 2005065726 A1	24-03-2005	AUCUN	

EPO FORM P0460

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82